



TITLE:

輸送現象(物性研「稀薄合金におけるs-d相互作用」研究会)

AUTHOR(S):

久米, 潔

---

CITATION:

久米, 潔. 輸送現象(物性研「稀薄合金におけるs-d相互作用」研究会). 物性研究 1969, 11(5): 357-361

ISSUE DATE:

1969-02-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/86817>

RIGHT:

## 輸 送 現 象

久 米 潔 (都立大理)

### 〔電気抵抗〕

Kondoは localized moment を持つ dilute alloy で  $J < 0$  の場合には電気抵抗は低温側で対数的に増大することを示した。これは多くの実験データとよく合っていた。しかし増大したその先 ( $T < T_K$  の領域) は問題として残されたのであって、理論的には Nagaoka のものなどでは根拠がはっきりしない点もあったし、実験的には超低温でないと観測できないとされていた。一方われわれは、周期律表上では localized moment を持つ領域と持たない領域の境界線上に位置を占め、奇妙な電気抵抗の温度変化を示す  $Au - V$  なる dilute alloy での localized moment の存在を問題にしていた。しかし phonon part を差引くことによってこの dilute alloy では  $T_K$  が実際  $300^\circ K$  近辺にあることを発見したのである。

その根拠は (1) 電気抵抗の impurity part は大体濃度に依らない温度変化を示す。(図1) (2) 高温での温度傾斜は  $J \sim 1 \text{ ev}$  として、Kondo 理論と合う。(3)  $T_K = 300^\circ K$  としても  $T_K = T_F \exp(-1/|J|e)$  から求めた  $J$  は  $0.6 \text{ ev}$  にしかない。(4) 帯磁率、比熱、熱電能など他の物性も同じ考えで consistent に説明できる。以上の諸点に拠っている。

われわれとは独立に Daybell たちは  $Cu - Fe$  dilute alloy の諸物性が  $T_K \sim 20^\circ K$  ととって全く同様に説明できることを示した。(図2)

この二つの結果は、温度スケールを15倍ずらすだけでお互によく合う。この事実はこの現象が普遍的に存在するものであることを暗示していたが、過去の実験データを探ることによって実際に一二他の例が見出された。

その一つは  $Au - Co$  (図3) である。 $Au - Co$  は localized moment を持つ領域と持たない領域の境界線上に位置するという意味で  $Au - V$  と同様の立場にある dilute alloy であるが  $T_K$  も同じ位だとなると話は合う。

もう一つは  $Au - Fe$  である。 $Au - Fe$  の実験データは多いが (図4 a - d) いずれも  $\sim 0.1^\circ K$  で  $\log T$  からはずれている。しかし濃度変化の詳しい実験

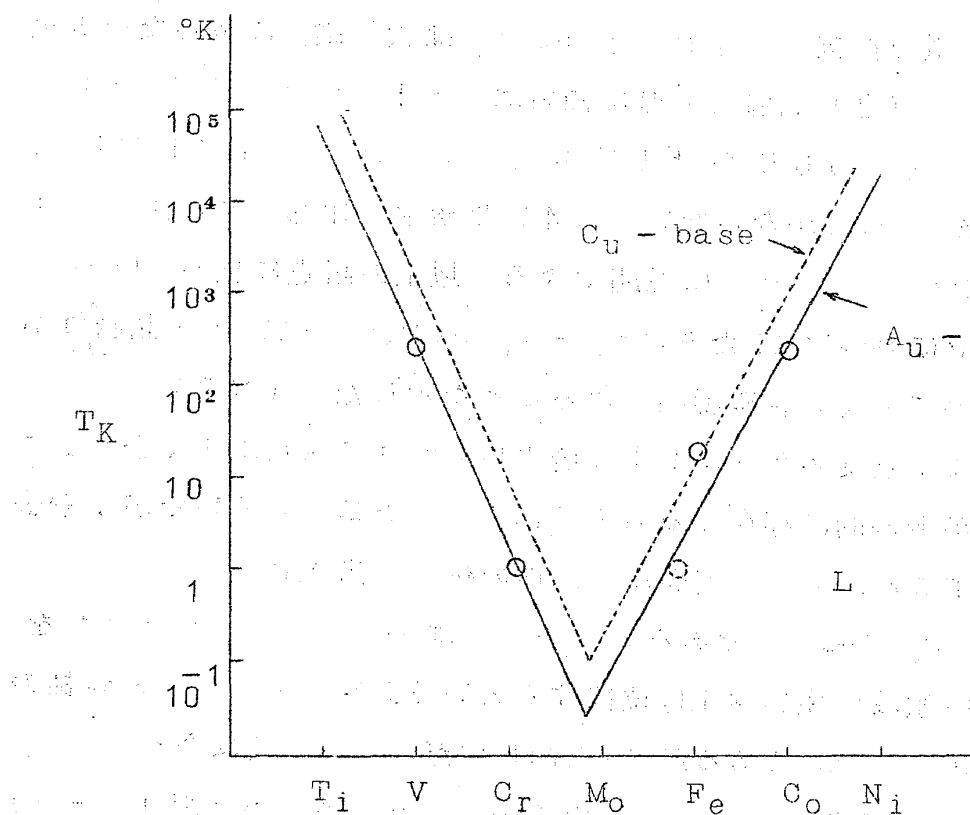
はない。

その後  $C_u - C_r$  での新らしい実験が報告された。 $T_K$  は  $\sim 1^\circ K$  である。(図 5) 極く低い濃度ではじめて濃度に依らない温度変化になっているがこれは  $T_K$  が低いためであろう。

以上で、電子構造が一番簡単と考えられる種類の dilute alloy つまり貴金属を base として  $d$  の遷移金属を impurity とする dilute alloy はつぎている。以上でないものは (1) impurity が溶け込まない (例えば  $Ag$  には  $Mn$  以外は溶けない) (2)  $T_K$  が測定できる温度範囲以外にあると考えられる、のいずれかである。

以上でできた dilute alloy の  $T_K$  をグラフにのせると次のようになる。

(図 a) これは帯磁率のワイス温度から見積った  $T_K$  を使った方がきれいにまとまるが、今の電気抵抗から見積ったものも大体同じ位置に来る。



(図 a)

今の場合の電気抵抗の実験は広い温度範囲をカバーすることがessentialであって、 $T_K$ のすくなくとも2ケタ下までは測定をのばさないと現象の全貌がつかめない。それで、 $T_K$ が $0.1^\circ\text{K}$ 以下と考えられる、 $M_n$ をimpurityとするdilute alloyでの電気抵抗の完全な実験はまだない。

次に残留抵抗（飽和抵抗）の大きさを考える。図6は $C_u$  baseのdilute alloyでのimpurityの種類による変化を示す。以前は、 $A_1$  baseのdilute alloyでは一つ山（図7）、 $C_u$  - baseのdilute alloyでは二つ山と考えられていたが、最近の十分に低温まで測定をのばした結果ではいずれも一つ山になったわけである。（図b）

以上の通り高温領域では $\log T$ に比例し低温領域では平らになる

という温度変化の形はnoble metal baseのdilute alloy

では普遍的になってきたが、

transition metal baseのdilute alloyでも同様の形を

持つものが二三見出されるようになった。

図8の $M_o - C_o$ 、図9の

$P_d - C_r$ 、図10の $Y - C_o$ がそ

れである。

一方理論では、s - dモデルか

らは高温部ではKondoの $\log T$ 、

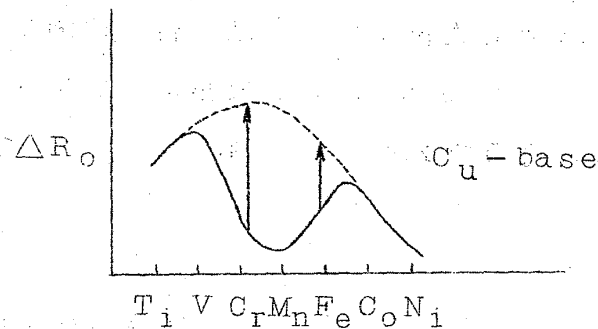
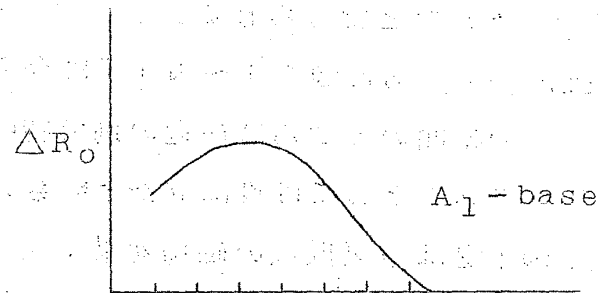
低温部ではNagaokaの放物線型

があったがNagaokaの解は

Hamannの解に進むことによって

別の形になっている。アンダーソンモデルからはSuhl等が実験と合う結果を得ている。低温部ではNagaokaと同じ放物線型 $\Delta R / \Delta R_0 = 1 - (T / T_K)^2$ になっている。

この形を実験と合せることによって個々のdilute alloyについてそれぞれ次のように $T_K$ が求まる。 $A_u - V \sim 3.00^\circ\text{K}$ 、 $C_u - Fe \sim 2.0^\circ\text{K}$ 、 $C_u - Cr$



〔図 b〕

久米 潔

$\sim 100\text{ K}$ ,  $P_d - C_r \sim 1000\text{ }^\circ\text{K}$ ,  $Y - C_e \sim 400\text{ }^\circ\text{K}$ .

$M_0 - C_0$  および  $A_u - C_0$  は実際に放物線型をしていないのでこの方法では  $T_K$  をきめることができない。これは場合によっては本質的な問題かも知れないが phonon part の差し引きにも問題があり得る。non-transition metal を impurity とする dilute alloy でも、単純に phonon part を差し引くと  $800\text{ }^\circ\text{K}$  近辺に巾のひろい山が残ることがある。例えば  $A_u - V$  でも濃度がうすい場合にはこうなることもある。

高温では  $\log T$  に比例し低温では平になるという電気抵抗の温度変化はかなり impurity の濃度が高くなっても定性的には変ってこない。この事実は  $A_u - V$  以外にも高温領域では  $A_u - C_r$ ,  $C_u - M_n$ ,  $A_g - M_n$ ,  $Y - C_e$  (図 1 U b)  $L_a$ ,  $L_u$  (図 1 6) などで見られる。

電気抵抗関係ではあと図 1 1 ~ 図 1 7 に今までの話に入らなかった例を集めておいた。この範囲のところは最近の例で特に目についたものを集めたのでデータの完全なリストとしては役に立たないものであることをお断りしておく。

図 1 1, 図 1 2 は電気抵抗の磁場効果, 図 1 3, 図 1 4 は localized moment を持つにもかかわらず電気抵抗極小がでないとして以前から有名な Rh-Fe, 図 1 5 は de Hass 効果の実験, 図 1 6 はアクチナイド系元素を impurity とした例, 図 1 7 は化合物の例である。

$R_h - F_e$  dilute alloy の異常については二三説明は試みられているがまだ定説はないようである。似た例に  $Y - R_e$  がある。

### 〔熱電能〕

熱電能については Suhl たちの理論がだされその結果によると  $T_K$  あたりを中心として対数温度目盛上で対称的な巾のひろい山が現れることになっている。

一方実験データは過去にかなりの報告があったが、それらのうち貴金属を base として 3 d の遷移金属を impurity とする dilute alloy についてのものを温度目盛を対数に変えて示した。(図 1 9 ~ 図 2 2)。  $A_u - V$  のデータ (図 1 8) は最近報告されたものである。

これらのデータを Suhl の理論と比較することによって個々の dilute alloy についてそれぞれ次のように  $T_K$  が見積られる。  $A_u - V \sim 2000\text{ }^\circ\text{K}$ ,

$C_u - Fe \sim 20^\circ K$ ,  $A_u - Fe \sim 8^\circ K$ ,  $A_u - Co \sim 250^\circ K$ ,  $C_u - Co \sim 200^\circ K$ .

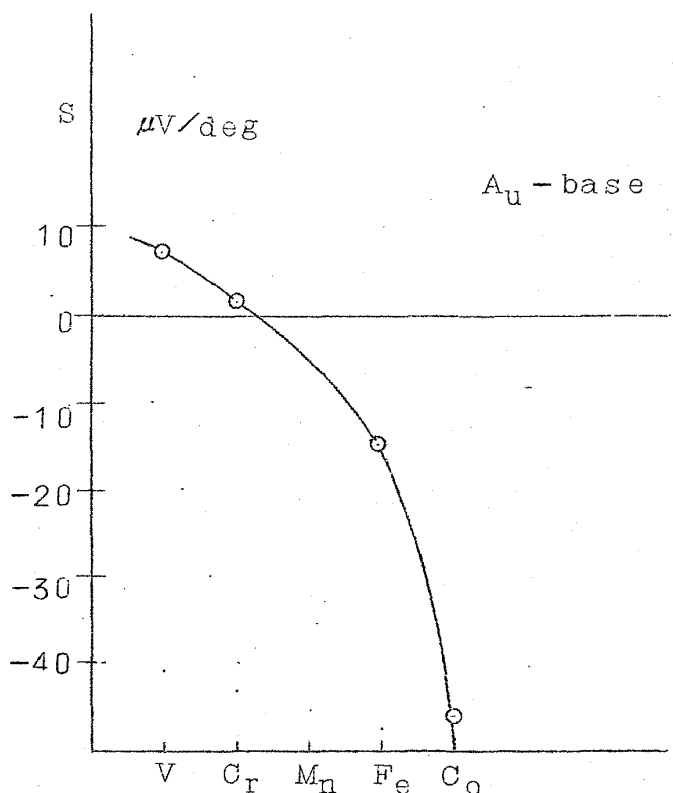
山の温度位置は impurity の濃度によってかなり変っている。しかし山の高さには濃度によっての変化がみられない。このため、実際にはとりきれないほど極微量の不純物が残っていてもそれによる大きな山が現れるのでデータの解釈は慎重を要する。

図 23 は  $Au - C_r$  dilute alloy でのわれわれの実験結果であるが、これは  $Fe$  不純物による  $\sim 8^\circ K$  に中心を持つ上向きの山が重なったものであるとして解釈された。従って熱電能から見積った  $A_u - C_r$  の  $T_K$  は  $\sim 4^\circ K$  である。

以上の  $A_u$  - base dilute alloy のデータを総合すると、山の向きに関して、less than half の遷移金属 impurity では上向き、more than half の遷移金属 impurity では下向きという経験則が得られることになる。図 24 (図 C) に impurity の種類による山の高さの変化を示す。 $C_r$  と  $M_n$  の中間で 0 をとるようである。 $C_u$  - base では実験データがまだ足りない。

Suhl たちの理論あるいは最近の Maki の計算によると熱電能の山の向きはポテンシャルの符号できまることになっている。従って熱電能の実験から、ポテンシャルの符号は less than half impurity ではマイナス、more than half impurity ではプラスと結論されたことになる。

遷移金属 base の dilute alloy でも二、三熱電能の実験が報告されている。図 25 は  $P_d - C_r$  のもの、図 26 は  $Y - C_e$  のものである。山の位置は電気抵抗の結果から見積った  $T_K$  とオーダーとして一致している。 $R_h - Fe$  の熱電能 (図 27)



〔図 C〕

は電気抵抗と同様異常である。(文中の図番号は研究会予稿集の図番号である。

1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26